www.unal.edu.co/icn/publicaciones/caldasia.htm Caldasia 30(2):413-420. 2008

CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE UN SISTEMA FLUVIOLACUSTRE TROPICAL, ANTIOQUIA, COLOMBIA

Morphometric characterization of a tropical fluviolacustrine system, Antioquia, Colombia

YIMMY MONTOYA MORENO

Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA). Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Apartado 1226, Medellín, Colombia. yimmymontoya3@hotmail.com; yimmymontoya3@gmail.com

RESUMEN

Se describen las características batimétricas y morfométricas de un lago tropical somero y las predicciones de carácter teórico derivadas de los análisis de los parámetros morfométricos y de los elementos de forma. Este sistema tiene veinticinco años de existencia y se caracterizó por presentar baja profundidad relativa y máxima (8m), al igual que una pequeña área ($A = 0.0041$ Km^2), poco dendrítica ($F = 1.77$), con una cubeta de forma convexa sin punto de inflexión (Cx). En la dirección mayor del lago (O-W) fluyen los vientos, por lo que la pista de acción del viento es amplia, lo que asociado con la alta estabilidad de la columna de agua ($D_r = 11\%$) muestra un patrón de mezcla de tipo polimíctico.

Palabras clave. Lagos, limnología física tropical, morfometría, morfología.

ABSTRACT

Bathymetric and morphometric characteristics of a shallow tropical lake are described and theoretical predictions derived from morphometric parameters and shape elements. This system is twenty-five years old and is characterized by low relative and maximum depth (8m), the same as a small area ($A = 0.0041$ Km^2), slightly dendritic ($F = 1.77$), with a convex shape having no inflection point (Cx). Wind flow follows the main direction of the lake (E-W), and wind action isassociated with the high stability of the water column (Dr = 11%); these factors contribute toa polymictic-type mixed pattern.

Key words. Lakes, physical tropical limnology, morphometric, morphology.

INTRODUCCIÓN

Los estudios morfométricos y morfológicos en el contexto colombiano se han dejado de lado, olvidando que brindan elementos que permiten comparar los grandes sistemas lénticos de zonas templadas, con los sistemas someros lacustres tropicales. Los elementos de forma y los parámetros morfométricos brindan una amplia información sobre las condiciones limnológicas de los sistemas lacustres, lo cual es de esencial valor a la hora de planificar los proyectos de investigación acuáticos. La morfometría de un lago está relacionada principalmente con su origen, historia y con las características geológicas de su cubeta y de su cuenca (Vega *et al.* 2005). La morfología de las cubetas lacustres tiene un importante efecto en la mayoría de los parámetros físicos, químicos y biológicos que en conjunto determinan el metabolismo de un lago (Barbosa & Tundisi 1980, Wetzel 2001). Por lo que cobra mayor importancia su estudio, ya que en el trópico las variaciones climáticas son menos acentuadas que en las regiones templadas, lo que indica una mayor influencia de las variables morfométricas sobre las condiciones limnológicas de los cuerpos de agua tropicales.

La caracterización morfométrica de un cuerpo de agua idealmente debe ser el punto de partida de las investigaciones limnológicas, ya que a partir de ésta se puede determinar la ubicación de las estaciones de recolección de manera metódica, adicionalmente, se genera una idea global sobre el funcionamiento del sistema teniendo en cuenta las áreas de interfase agua – aire y agua – sedimento (Montoya-Moreno 2005). La información morfométrica es necesaria para investigar sobre la erosión, cargas de nutrientes, balances de masa, contenido calórico, estabilidad térmica, comunidades y productividad biológica, entre otras. Håkanson (1981) plantea que para propósitos científicos, en hidrología y en el contexto limnológico y sedimentológico, es de interés primario tener un mapa batimétrico que ilustre la morfología general de la cubeta, como también de la mayoría de los accidentes topográficos, tales como picos subacuáticos, agujeros profundos y cuellos de botella.

En Colombia se han realizado algunas investigaciones morfométricas en embalses (Hernani & Ramírez 2002), en lagos (Ramírez 2000a, Montoya-Moreno 2005) y en ciénagas (Aguirre 2005, Montoya-Moreno & Aguirre, ined.).

Con este trabajo se pretende evaluar las características morfométricas y batimétricas de un sistema fluviolacustre tropical somero y establecer predicciones teóricas basadas en el análisis de los parámetros y elementos morfométricos utilizados, los cuales sirven como punto de partida para la implementación de sucesivas campañas de monitoreo y evaluación limnológicas, con el fin de generar conocimiento global de este sistema acuático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se realizó durante el mes de septiembre del 2004 en la vereda Cristo Rey del municipio de El Carmen de Viboral, al oriente del departamento de Antioquia (6º 05' 09" N 75º 20' 19" W), el área de influencia del cuerpo de agua tiene una temperatura promedio de 17 °C, una altura de 1920 m. s. n. m. y una precipitación pluvial anual oscilando entre 2.150 y 2.235 mm, lo que lo tipifica el sector de muestreo como una zona de vida bh - MB (Espinal 1992). El suelo de la región comprende materiales derivados de rocas ígneas y metamórficas, así como también terrazas y aluviones cuaternarios y mantos de cenizas volcánicas depositados sobre las rocas mencionadas altamente meteorizadas. Los suelos son profundos, de texturas medianas y livianas, con muy buena permeabilidad y con una gruesa capa de cenizas volcánicas (Moreno 1995).

El lago fue "construido" en 1986 al colocarle una barrera de tierra compactada en la parte inferior del curso de la quebrada La Cimarronas, se encuentra a 6º 8' 45" N y 75º 20' 54" W, actualmente el sistema no esta siendo objeto de uso. Se observa la presencia de un gran número de plantas acuáticas del género *Nymphoides* sp., una planta flotante que cubre la porción occidental del área del espejo de agua.

Levantamiento batimétrico

El sistema por su origen es rodeado en dirección oriente-occidente por colinas en ambos flancos, generando un sistema fluviolacustre encañonado. Sobre la orilla del cuerpo de agua se colocaron estacones de madera y con la ayuda de fibra de plástico se procedió a demarcar un rectángulo que incluyó todo el espejo de agua. Luego se colocaron estacones cada 4m, lo que permitió cuadricular el lago en secciones de 4m x 4m; empleando un bote y con una vara calibrada se procedió intersección por intersección a determinar la profundidad y se midió la distancia entre el borde del perímetro del lago y la línea correspondiente con el fin de trazar el contorno del mismo. Con estos datos en el laboratorio se elaboró un plano del lago uniendo los puntos de igual profundidad (isobatas) y mediante el método gravimétrico (Sperling 1999) se determinó el área de cada una de las secciones del lago y mediante el programa Autocad versión 2004 se dibujó la batimetría del cuerpo de agua. A partir de estos datos y de las recomendaciones de Wetzel & Likens (1991), Håkanson (1981), Håkanson (1982), Håkanson & Janson (1983), Sperling (1994), Sperling (1999) y Wetzel (2001) se construyeron curvas hipsográficas con las que se estableció la forma del lago y se calcularon los parámetros morfométricos básicos para el cuerpo de agua.

RESULTADOS

La figura 1 muestra la batimetría del lago, la cual indica que la vertiente norte presenta la mayor pendiente siendo esta a su vez, la zona con menor cobertura vegetal predominando el pasto; se observa también un cambio brusco en la pendiente y aumento de la profundidad del sistema en el eje E - W alcanzando los 8 m, en dirección al dique construido hace 20 años. En la parte sur la pendiente es mucho menos pronunciada y por ende en esta área el lago es menos profundo. La rivera en esta zona presenta una cobertura vegetal del 100% dominada por plantas de la familia Melastomataceae especialmente siete cueros (*Tibouchina lepidota*) y amarrabollo (*Meriania nobilis);* y de la familia Clusiaceae principalmente el Chagualo *(Clusia multiflora).*

Este sistema fluviolacustre presenta una entrada de agua permanente en la porción más oriental del mismo (Q = 1.5 l s^{-1}) y una salida de menor tamaño en la región opuesta a la anterior, la cual no alcanzó a verter agua durante el tiempo de estudio, por lo que la salida principal de agua del sistema se debe a la evaporación y evapotranspiración. En general, el contorno de las isobatas describe una topografía simple, en donde se reconoce el cauce del arroyo que surte el sistema y que corre por el lecho del lago, por lo que este sistema puede denominarse como el recrecimiento de un tramo fluvial.

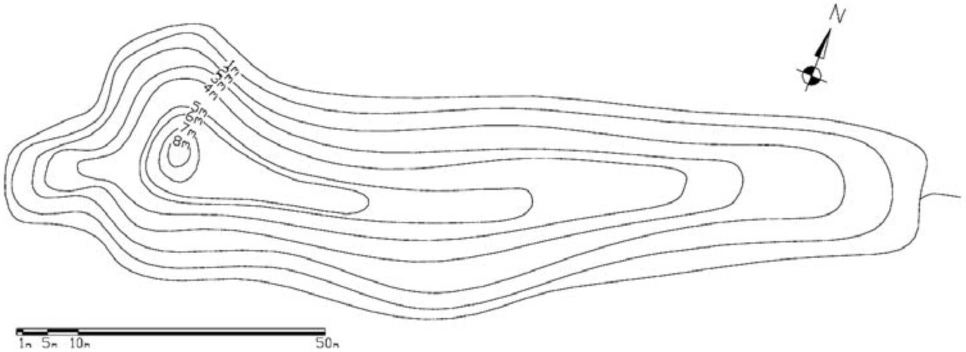

Figura 1. Mapa batimétrico del sistema fluviolacustre.

La tabla 1 presenta los valores de los principales parámetros morfométricos y elementos de forma evaluados para el lago estudiado, la cual es complementada por la figura 2 que presenta las curvas hipsográficas relativas para la superficie y el volumen. De acuerdo con esta información, el sistema fluviolacustre es un cuerpo de agua pequeño, somero, con transparencia baja, forma rectangular, zona litoral poco desarrollada, con vaso en forma de V, con tendencia a la polimixis y oligomesotrófico.

Tabla 1. Valores de los parámetros morfométricos evaluados en el sistema fluviolacustre tropical.

Parámetro	**Lago**
Longitud máxima (Lmax), m	148.4
Longitud máxima efectiva (Le), m	146.7
Ancho máximo (Bmax), m	40.7
Ancho máximo efectivo (Be), m	37.3
Ancho medio (Bm), m	26.8
Profundidad máxima (Dmax), m	8
Profundidad media (Dm), m	0.75
Profundidad tercer cuartil (D75), m	0.9
Profundidad mediana (D50), m	2.07
Profundidad del primer cuartil (D25), m	3.69
Profundidad relativa (Dr), %	11
Dirección del eje mayor	E – W
Perímetro (Lo), m	404.8
Área total (A), m^2	4152.5
Volumen (V), m^3	3098.6
Índice de desarrollo del perímetro (F), adimensional	1.77
Índice de desarrollo de volumen (Vd), adimensional	0.25
Forma del lago	Cx
Dm / Dmax	0.08
Lmax / Bmax	3.65
% de pendiente media ($\bar{a}_p$), %	11
Elipsoidad (E), adimensional	0.73
Factor de energía E, adimensional	7.16
Factor de pendiente (S), %	1.0026
Factor de forma (Vd^{-1}), adimensional	4
Áreas de erosión + transporte (A_{E+T}), %	51.9
Área de transporte (D_{T-A}), %	26
Área de acumulación (a_A), %	48.1
Profundidad crítica, m	2.34
Altitud (m.s.n.m)	1920

DISCUSIÓN

El eje mayor del sistema fluviolacustre se orienta en dirección oriente – occidente conservando la dirección de flujo por donde corría la quebrada y tiene una longitud de 148.4 m, la cual señala una forma alargada, siendo este eje la principal pista de acción para el viento el cual no encuentra ninguna barrera (islas, accidentes topográficos) actuando en la misma dirección que el flujo de la quebrada la Cimarronas, este predominio del el eje longitudinal repercute en el régimen térmico del sistema, además que el 98.8% de la longitud máxima del sistema (L_{max}) sirve como pista efectiva del viento y presenta un mayor valor que el ancho máximo del sistema (B_{max}). Por lo anterior, es claro que este sistema se caracteriza por una fuerte asimetría con una relación L_{max} / B_{max} de 3.65, por lo que se aleja de la forma circular como lo indica el valor del índice de desarrollo del perímetro (F = 1.77) el cual es bajo, por lo que la relación entre la longitud actual de la línea de costa y la longitud de un circulo con un área igual al área total del lago es baja, por lo que se esta comparando es un rectángulo respecto a un círculo, por lo que el sistema es poco dendrítico. Valores bajos de F se han encontrado en Brasil principalmente en lagunas costeras (Sperling 1999). Consecuentemente, el grado de elipsoidad (E = 0.73) se aleja de una forma circular, cuyo valor sería de cero. Por lo que no se presentan amplias zonas de acumulación de macrofitas; estas sólo encontraron en el eje principal en dirección hacia la barrera (aguas más someras), dado el predominio de fuertes vientos en esta misma dirección y en la zona de la rivera, pero con una capa de menos de 1m de largo paralela a esta.

Al comparar el perímetro respecto a la longitud máxima (L_o / L_{max}), se encuentra una relación 2.7 a 1, por lo que el bajo desarrollo de la línea de costa, sumado al predominio de materiales limosos-arcillosos, limitan la fijación de las comunidades perifíticas y la productividad primaria béntica.

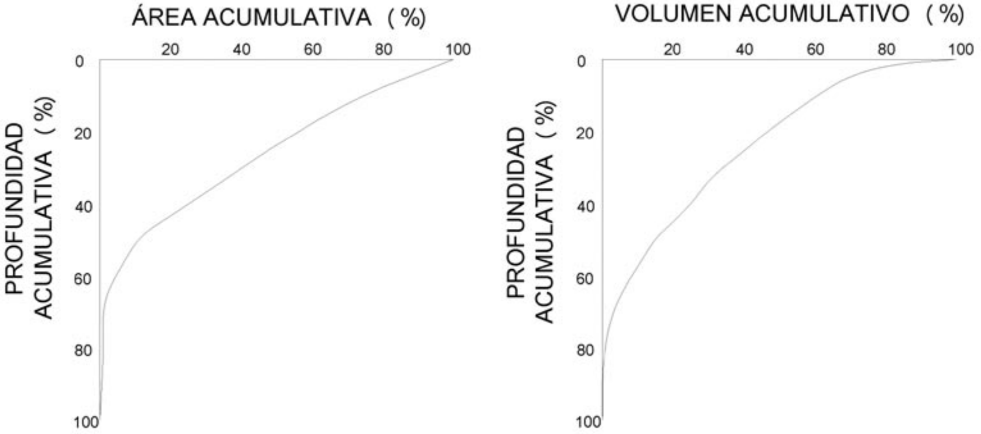

Figura 2. Curvas hipsográficas relativas para la superficie y el volumen.

El lago de Avinal posee una profundidad máxima de 8m en la zona próxima al talud artificial, por lo que se considera como un sistema somero (D_{max} < 10m, Barbanti 1985); este cuerpo de agua tiene una profundidad media de 0.75m la cual es debida a las bajas pendientes que se presentan. La profundidad media es el parámetro más útil en los modelos que describen la productividad y el estado trófico de los lagos (Håkanson 1981). A partir de las investigaciones de Donato *et al.* (1996), Ramírez (2000b) y Montoya-Moreno (2005) se elaboró la figura 3 que permite comparar el sistema fluviolacustre en estudio, respecto a otros cuerpos de agua colombianos, se observa que se presentan cuatro grupos, el primero esta conformado por las ciénagas (baja altitud y alta D_m), continua el grupo de los embalses (altitud media y alta D_m), el tercer grupo esta conformado por los lagos artificiales incluyendo el estudiado en esta investigación, los cuales se encuentran a una altitud media y una profundidad media baja y finalmente, el grupo de los sistemas lénticos de alta montaña, los cuales presentan alturas superiores a los 3000m y una D_m media. El análisis de regresión entre la profundidad media y la altura sobre el nivel del mar no fue significativo ($r = -0.06$, $p = 0.8$), lo cual es debido al hecho de que la mayoría de los sistemas evaluados son sistemas artificiales. Cole (1983) plantea que existe una relación inversa entre la profundidad media del lago y el peso de la biomasa planctónica, por lo que un sistema como el estudiado debería tener una alta biomasa, lo cual no se encontró, ya que el promedio de clorofila a encontrado es de 14 mg m^{-3}, lo cual es debido a que se encontraron comunidades fitoplanctónicas con bajas densidades, riquezas y tamaños.

La profundidad mediana (D_{50}) fue de 2.07m, es decir, que en sólo el 22% de la profundidad del sistema fluviolacustre se encuentra el 50% del agua almacenada, ya que la profundidad media es baja, lo que se asocia a que la profundidad relativa (D_r) es de 11%, la cual presenta un valor alto, característico de lagos de pequeñas dimensiones (Rico *et al.*1995), ya que el cuerpo estudiado es prácticamente un brazo de la quebrada original el cual fue taponado creándose a si un cuerpo que posee una pequeña área en relación con la profundidad del terraplén que lo constituye.

La profundidad relativa se relaciona con las condiciones de estabilidad y estratificación del cuerpo de agua, con la transparencia y con el nivel de productividad. En general, los lagos con área superficial grande y poca profundidad presentan valores de D_r menores del 1%, mientras que lagos y embalses pequeños y profundos tienen valores altos de D_r (Hernani & Ramírez 2003), por lo que se puede esperar que este cuerpo de agua presente una alta estabilidad térmica y una amplia zona fótica, la cual desde el punto de vista de la evaluación en campo no se ha observado debido al bajo valor de la profundidad máxima, al efecto del viento sobre la resuspensión de materiales creando una restricción lumínica y / o al ingreso del tributario por la parte media inferior del sistema. Estos factores pueden generar un proceso sinérgico de resuspensión de materiales tanto alóctonos como autóctonos en diferentes grados de mineralización, por lo que los valores observados de transparencia para este sistema han sido inferiores a 1.1m, es decir, sólo el 13% D_{max} corresponde a la zona iluminada.

La relación entre la profundidad media y máxima (D_m / D_{max}) fue menor de 0.4, por lo que el sistema fluviolacustre presenta un perfil cónico recto el cual implica un menor riesgo de colmatación ante el aporte de sólidos. Para la mayor parte de los lagos este valor es mayor de 0.33, valor que se obtendría en una depresión cónica (Wetzel 2001).

Con referencia al estado trófico del lago, el coeficiente de atenuación lumínica (0.67 m^{-1}), presentó un valor correspondiente al de un lago oligomesotrófico, muy alejado del valor citado por Howard-Williams & Vincent (1984) para un lago turbio (K = 6.7 a 10.0 m^{-1}).

El valor reportado del índice de desarrollo del volumen (V_d) es inferior a la unidad, por lo que se pueden considerar a este sistema con forma de V, es decir, un lago pequeño con el fondo de la cubeta más o menos uniforme. La mayor parte de los lagos del planeta tienen un V_d superior a la unidad, así que su forma se aproxima a la letra U (Sperling 1999). La forma del lago es convexa (Cx), la cual es poco común entre los ecosistemas lénticos (p = 24.2%) (Håkanson 1981). El factor de forma presenta un valor de cuatro, el cual esta en el límite entre la forma convexa y muy convexa, este es un factor que involucra la curva hipsográfica del lago y el expresa el hecho de que los lagos con curvas hipsográficas convexas tienen una mayor área de agua superficial la cual puede ser influenciada por la acción del viento y del oleaje, respecto que los lagos con curvas hipsográficas cóncavas (Håkanson & Janson 1983).

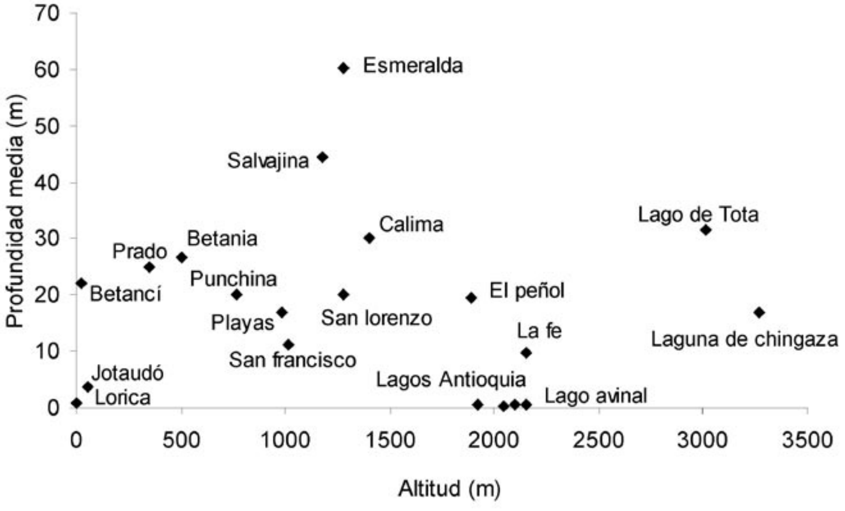

Figura 3. Relación entre la altitud y la profundidad media.

Los mismos autores definen el cociente $\sqrt{a} / D_m$ como el radio dinámico, el cual enfatiza en la dinámica del fondo. Como el valor encontrado para este sistema es de 86 el cual es superior a 3.8 (Håkanson & Janson 1983), el valor calculado para el área de erosión + transporte (A_{E+T}) a partir de las curvas hipsográficas debe corregirse, pasando de 51.9% al 100%. Para este tipo de lagos en los que el área es pequeña en comparación con la profundidad media de la columna, la actividad de la resuspensión debida a la acción del viento y del oleaje pasan a un segundo plano, siendo dominantes los procesos de acumulación en la mayoría de los aspectos limnológicos, ya que el área de erosión y transporte (A_{E+T}) disminuye rápidamente con el aumento de los valores de la D_r por encima de 4%. Debido a que el factor de inclinación (S) y el porcentaje de la pendiente media del sistema son menores al 15%, se espera que los materiales finos erosionados por el movimiento de agua en las orillas, rueden rápidamente hacia las zonas de acumulación (Barbanti 1985).

Por otro lado, el ingreso de la quebrada La Cimarronas puede contribuir con el aumento del material alóctono. Debido al bajo caudal aportado, la carga de sólidos que transporta este afluente sólo alcanza a impactar la zona de ingreso en dirección occidente-oriente, pero la afectación ocurre más por depositación que por erosión, por lo que en esta zona se presenta la menor profundidad promedio respecto a todo el sistema acuático estudiado y una alta cobertura de macrófitas.

Respecto de diferentes lagos de los Andes (Castillo-Jurado, 1992), el área del lago Avinal es 72 veces inferior al área mínima encontrada (n = 72 lagos). La profundidad máxima es tres veces inferior, por lo que la relación profundidad media/profundidad máxima es de 0.08, siendo 0.428 el menor valor para los lagos andinos mencionados. La profundidad relativa del lago Avinal presentó un valor alto (11%), el cual es 2.8 veces superior que el valor máximo reportado. Los valores morfométricos alejados de los promedios de los lagos andinos son reflejo de la naturaleza artificial del lago.

CONCLUSIÓN

Según las predicciones limnológicas, el lago es un sistema oligomesotrófico raso, con una cubeta pequeña en forma de U, en la cual predominan las zonas de acumulación de materiales en diferentes grados de mineralización. Se presenta un volumen de agua iluminado cercano a la mitad del volumen del cuerpo de agua, el cual corresponde a zonas someras las cuales presentan poco intercambio de materiales con las orillas del lago, debido a que el sistema es poco dendrítico. El funcionamiento térmico del lago presenta una gran tendencia a la estratificación, la cual es favorecida por las características morfométricas del sistema. Debido a las temperaturas bajas en la noche, se presenta isotermia, configurando el lago como de tipo polimictico. Las características morfológicas y morfométricas del lago Avinal se alejan de la tendencia para los lagos andinos debido al tipo de origen artificial.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a Boris Montoya M., por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

LITERATURA CITADA

Aguirre, R.N. 2005. Análisis de la relación río-ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia. Universidad Nacional-Universidad de Antioquia, Medellín.

Barbanti, L. 1985. Some problems and new prospects on Physical Limnology. Lymnology: a review. Memorie dell´ Istituto Italiano di Idrobiol. 43: 1-32.

Barbosa, F.A., R. & J. G. Tundisi. 1980. Dial variations in a shallow tropical Brazilian lake I. The influence of temperature variation on the distribution of dissolved oxygen and nutrients. Arch. Hydrobiol. 116: 333-349.

Castillo-jurado, M. 1992. Morfometría de lagos una aplicación a lagos del Pirineo. Tesis de doctorado, Universidad de Barcelona. Barcelona.

Cole, G. 1983. *Textbook of limnology.* C. V. Mosby Company, Toronto.

Donato-rondon, C.H., L.E. Gonzalez & C.L. Rodríguez. 1996. *Ecología de dos sistemas acuáticos de páramo.* Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras Nro. 9. Bogotá.

Espinal, L. S. 1992. Formaciones vegetales de Antioquia. Revista de la Facultad Nacional de Agronomía 24: 60-67.

Håkanson, L. 1981. *A manual on lake morphometry.* Springer Verlag, Berlín.

Håkanson, L. 1982. Bottom dynamics in lakes. Hidrobiology 91: 9-22.

Håkanson, L. & M. JANSSON. 2002. *Principles of lake sedimentology.* Blackburn Press. Nueva Jersey.

Hernani, T.A. & J.J. Ramirez. 2002. Aspectos morfométricos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: Represa La Fé, El Retiro Colombia. Caldasia 101: 511-518.

Howard-williams, C. & W.I. Vincent. 1984. Optical properties of New Zealand Lakes. I. Attenuation, scattering, and a comparison between downwelling and scalar irradiances. Archiv Fur Hydrobiologie 99: 318-330.

Moreno, F.H. 1995. Plan maestro para el manejo de tres áreas protegidas en la jurisdicción de Cornare. Cornare-Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Montoya-Moreno, Y. 2005. Caracterización morfométrica básica de tres lagos someros en el municipio de El Carmen de Viboral (Antioquia), Colombia. Actualidades Biológicas 27: 79-86.

Ramírez, J.J. 2000a. Variación diurna y estacional del contenido calórico, la estabilidad y el trabajo del viento en una laguna tropical. Acta Limnol. Bras.12: 39-54.

Ramírez, J.J. 2000b. *Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios.* Universidad de Antioquia, Medellín.

Rico, E., Chicote, M.E. & C. Montes. 1995. Batimetría y morfometría del lago de Arreo (N. España). Limnética 11: 55-58.

Sperling, E.V. 1994. Morphometric features of some lakes and reservoirs in the state of Minas Gerais. Págs. 71-76 en: R. Pinto-Coelho, A. Giani & E. Sperling (eds.). Ecology and human impact on lakes and reservoirs en Minas Gerais with special reference to future development and management strategies. SEGRAC, Belo Horizonte, Brasil.

Sperling, E.V. 1999. *Morfología de lagos e represas.* Belo Horizonte: DESA / UFMG, Brasil.

Vega, J.C., C. de Hoyos, J.J. Adasorio, J. de Miguel & H. Fraile. 2005. Nuevos datos morfométricos para el Lago de Sanabria. Limnética 24: 115-122.

Wetzel, R.G. & E.G. Likens. 1991. *Limnological Analyses.* 2nd. Ed. Springer-Verlag. Nueva York.

Wetzel R.G. 2001. *Limnology: Lake and river ecosystems.* 3^{a} ed. Academic Press, San Diego.

Recibido: 30/11/2006
Aceptado: 08/05/2008